

UWSP: 水下无线传感器网络节点休眠协议

洪璐¹, 洪锋²

(1. 潍坊学院 计算机工程学院, 山东 潍坊 261061; 2. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 休眠机制是传感器网络节点节约能量、延长工作寿命的重要手段之一。现存的水下传感器网络 MAC 协议主要考虑提高网络传输性能, 对休眠机制的研究和涉及较少, 并且仅有的一些休眠策略存在着因节点工作时间较为分散而导致的节点休眠-唤醒频繁的问题。节点频繁唤醒不仅会浪费额外的能量来启动电路, 折损硬件寿命, 还会增加数据传输冲突的概率。针对水声网络信道的独特性质, 提出了一个基于树形拓扑结构的水下传感器网络节点休眠算法, 该算法能够有效缩短节点唤醒次数, 延长休眠时间, 并保证端到端的传播延迟不受休眠时间的影响。该算法无冲突也无需预约信道, 保证了较高的网络流量。最后, 通过仿真实验验证了算法的可用性和效能。

关键词: 休眠算法; MAC 协议; 水下传感器网络

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)Z1-0162-08

UWSP: sleeping algorithms for underwater sensor network

HONG Lu¹, HONG Feng²

(1. Department of Computer Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China;

2. College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Sleeping scheme is one of the key means of saving energy for wireless sensor network. However, existing MAC protocols for underwater sensor network (UWSN) mainly focus on maximizing throughput but ignore sleeping schemes. Moreover, in existing sleeping schemes nodes wake up rapidly, which will loss the life of hardware, waste energy to open/close circuits, and increase collision probability. So, a tree topology based sleeping algorithm for UWSN was proposed, which utilizes the special characteristics of underwater acoustic channel. This algorithm could reduce wakeup frequency, prolong sleeping time and keep the end to end delay from being affected by sleeping time. This algorithm has no collision and no channel reservation and its usability and capability have been verified by simulation methods.

Key words: sleeping algorithm; MAC protocol; underwater sensor network

1 引言

对无线传感器网络而言, 对信道的空闲侦听是节点浪费能量的一个重要因素, 因此, 在这种状态下应允许节点关闭天线, 进入休眠状态以节省能量。

近年来无线传感器网络的研究者提出了许多“能量高效”的 MAC 协议, 这些协议允许节点周期性的休眠和唤醒, 大体上可分为同步和异步的休眠 2 类。同步的休眠要求节点具备全局的时钟同步并且在同一时刻进入休眠/唤醒状态, 而非同步的

休眠不要求节点时钟同步, 节点的休眠/唤醒时间各不相同, 因此需要设计一个发送方对接收方的唤醒策略。

水下传感器网络是一类使用声波进行通信的特殊传感器网络, 声波在水中的传播速度只有约 1 500 m/s, 比无线电的传播速度低数个数量级, 因此水下信号传播延迟大是水下网络的主要特征之一。这一特性为网络节点的数据传输调度带来很大挑战^[1]: 首先, 信道预约(如握手机制)将耗费大量的时间; 其次, 流量控制和差错控制的响应也会

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60933011, 61170258)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(60933011, 61170258)

很慢;再次,链路延迟大带来“时空不确定性”的问题,即 2 个站点的消息是否冲突不仅取决于它们的发送时间,还取决于这 2 个站点的地理位置;最后,由于逐跳的链路延迟、退避时间和保护时间的积累,水下网络的端到端通信延迟很高。

综上所述,为水下网络设计休眠协议是困难的,更会使水下网络本来就低下的通信能力“雪上加霜”。并且由于水声通信的特殊性质,传统的针对无线电传感器网络设计的休眠 MAC 协议在水下无法直接使用。

现有的水下传感器网络 MAC 协议对节点休眠算法涉及较少,对于可直接使用休眠策略的 TDMA 协议(如 ST-MAC, UW-FLASHR 等)来说,节点的工作时间,即发送时间和接收时间较多且十分分散,会导致节点唤醒十分频繁。频繁的节点唤醒不仅会浪费额外的能量来启动电路,折损硬件寿命,还会增加数据传输冲突的可能性。原因在于这些 TDMA 协议只考虑了如何尽可能地提高网络的传输并行度及数据流量,未考虑节点的能量效率问题。因此对节能要求很高的水下传感器网络来说并不适合^[2,3]。

鉴于已有方案的不足,本文提出了基于树形拓扑的水下传感器网络节点休眠算法 UWSP,该算法以最小化端到端延迟和唤醒频率,最大化休眠时间为目的,由父节点选定其子节点的休眠周期,休眠时间的确定保证了各个节点的休眠和活跃时间不会引起冲突。该算法无冲突也无需预约信道,并保证了较小的信道空闲时间和较高的网络流量。仿真结果表明与已有方案相比,本文提出的休眠算法具有更高的通信效率和能量效率。

2 算法设计

本节首先介绍 UWSP 协议的网络模型和冲突模型,然后详细介绍协议的主要流程,最后对其进行理论分析并进一步优化。

2.1 网络模型和冲突模型

本文算法针对形拓扑结构设计,其网络模型如图 1 所示。树型拓扑结构是传感器网络进行数据采集最常用的拓扑结构,并且方便部署 CDMA、FDMA 等冲突避免机制。

本文的分析基于如下假设:

1) 水下网络为静态网络,链路延迟为固定值,网络拓扑结构为 n 层树型结构,其根节点为基站。

2) 节点拥有相同的通信半径和冲突半径,并能通过定位算法获得自己的地理位置信息。

3) 节点通过与邻居交互能够获得其两跳范围内的局部网络拓扑结构。

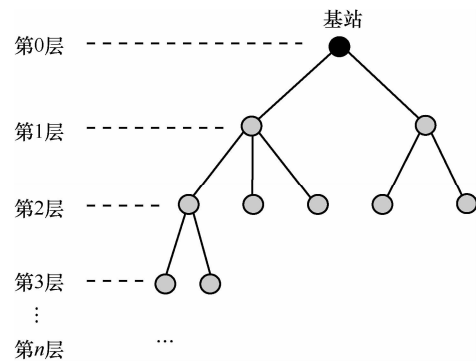


图 1 网络模型

在树型拓扑结构下,节点之间的冲突状态可分为 3 类,如图 2 所示。

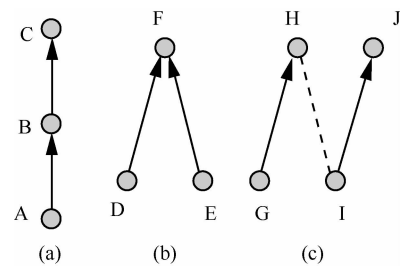


图 2 树型拓扑的 3 类冲突状态

(a) 由于水下声学调制解调器为半双工,不能同时发送和接收,因此当一个节点正在发送时,如果收到来自其子节点的消息,会产生冲突。

(b) 2 个不同子节点的消息同时到达父节点时,也会产生冲突。前 2 类冲突发生在父节点与子节点之间,因此也被称为“家族内部冲突”。

(c) 如果某个节点位于另一个节点的子节点干扰范围之内,则当它接收来自子节点的消息时,有可能会被干扰。例如图中的 H 节点,接收 G 的消息时如果来自 I 节点的干扰信号同时到达,则 H 处产生冲突,这种冲突称之为“家族间冲突”。

设计算法时应避免图 2 所示的所有可能的冲突,本文采用协调发送者与接受者的工作时间的的方式避免冲突。

2.2 算法流程

UWSP 的基本思想是将节点的接收和发送活动集中在一起,尽可能地减少节点的休眠频率,尽可能地延长节点的休眠时间和减少节点的空闲

侦听。在树型拓扑结构下，每个节点都有一个或多个子节点，但有且仅有一个父节点。因此，通过父节点进行节点的收发调度较为合适，冲突的可能性最小。

节点的所有接收和发送时间统称为工作时间。如图 3 所示，节点的一个通信周期由工作时间和休眠时间组成，工作时间分为不同的时隙，节点在这些时隙中完成发送和接收任务。

一个工作/休眠周期的长度 T 可由具体的网络应用决定，例如，在数据采集和环境监测的传感器网络中， T 可取值为采样时间间隔。时隙长度 T_p 为节点接收或发送一个帧需要的时间。节点首先依次接收其各个子节点发送的数据帧，最后一个时隙将自己的消息发送给其父节点。为方便分析，本文假设网络采用了数据融合算法，每个节点的负载相同。当然 UWSP 适合于节点负载不同的任意情况，只需要根据节点自身的负载状况在其工作时间内追加发送时隙 S 即可。

对于以接收者为中心的调度算法来说，最关键的问题在于，当接收方确定自己的工作时间后，发送方如何确定自己的工作时间。如图 4 所示，节点 e 为 m 的父节点， e 的工作时间从 $t_s(e)$ 开始，由于 e 有包括 m 在内的多个子节点，定义 $X(m)$ 为 m 在 e 的接收队列中的序号，定义 e 、 m 的子节点数目分别为 $C(e)$ 、 $C(m)$ ， $m \rightarrow e$ 的链路延迟为 $L(m)$ ，则节点 m 工作时间的开始时刻 $t_s(m)$ 可由下式计算

$$t_s(m) = t_s(e) + (X(m) - 1)T_p - L(m) - C(m)T_p \quad (1)$$

假设网络的初始化时刻为 0，则应对式(1)所得的负值结果规格化为正值，已知节点周期长度为 T ，则：

$$t_s(m) = \{T + t_s(e) + [X(m) - C(m) - 1]T_p - L(m)\} \bmod T \quad (2)$$

UWSP 的主要流程可描述为：位于第 0 层的根节点（即基站）首先确定自己的工作时间，并确定其子节点的发送次序（第一层），然后将它的决策向所有子节点广播。每个第一层的节点收到消息后根据式(2)计算出自己的工作时间，然后安排自己的子节点的发送次序并广播到第二层。每一层的节点都要等待其父辈完成决策以后才对自身进行决策，这一过程不断持续，直到决策传播到叶节点（第 n 层），叶节点计算出自己的工作时间，算法结束。

子节点的发送次序由节点到其父节点的距离大小决定，父节点将其所有子节点按照距离由大至小的顺序排序，并作为接收其消息的次序。

根据协议的流程，假设网络的初始化时间为 0，则基站的第一个工作/休眠周期的开始时刻即为 0，任意节点 m 的第一个工作/休眠周期的开始时刻 $t_s(m)$ 满足 $0 \leq t_s(m) \leq T$ 。实际上，根据式(2)的计算，基站第二个周期才会收到数据，第一个周期的开始时间仅对其子节点的时间分配具有指导意义。

式(2)表明，节点的开始时刻与许多参数相关，如它的子节点的数量，它在其父节点接收序列中的

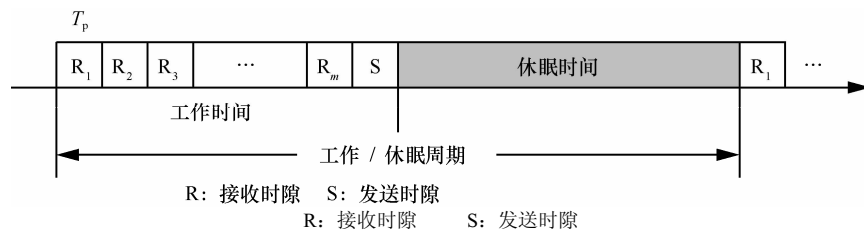


图 3 算法的工作/休眠周期示例

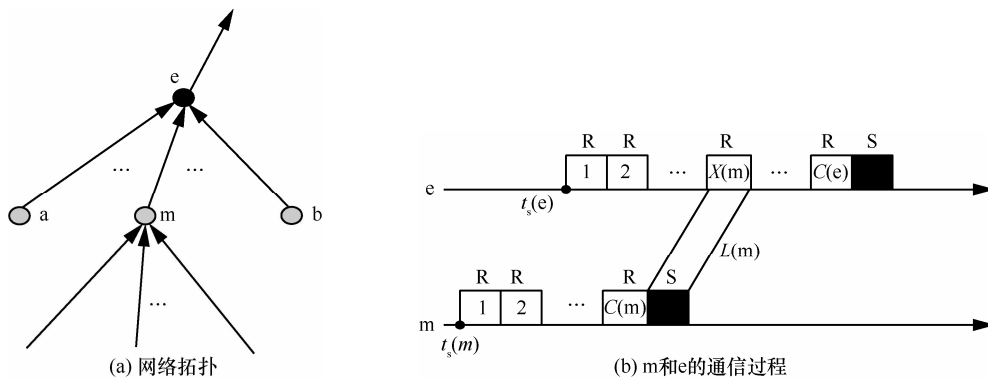


图 4 发送者—接收者通信过程

位次, 它到其父节点的延迟, 它的父节点的开始时刻等等。这导致了所有节点的开始时刻都不相同, 因此 UWSP 的工作/休眠周期都不同步。网络中的所有节点使用的是相同周期长度的、异步休眠机制。

2.3 算法优化与分析

由式(2)确定的开始时刻能够消除所有的“家族内部冲突”, 它可以使接收者无冲突地依次接收所有子节点的消息, 但由于未考虑家族外部节点的干扰情况, 因此本小节讨论 UWSP 如何应对“家族间冲突”的情况。

如图 5 所示, 如果当 e 正处于接收状态时 (即位于工作时间的 R 时隙), 来自节点 c 的干扰信号恰好到达, 则会产生“家族间冲突”。因此对于不同层次的节点 e 和 c 来说, 产生家族间冲突的条件为

$$t_s(c) + C(c)T_p + L_e(c) < t_s(e) + C(e)T_p \parallel$$

$$t_s(c) + [C(c) + 1]T_p + L_e(c) > t_s(e) \quad (3)$$

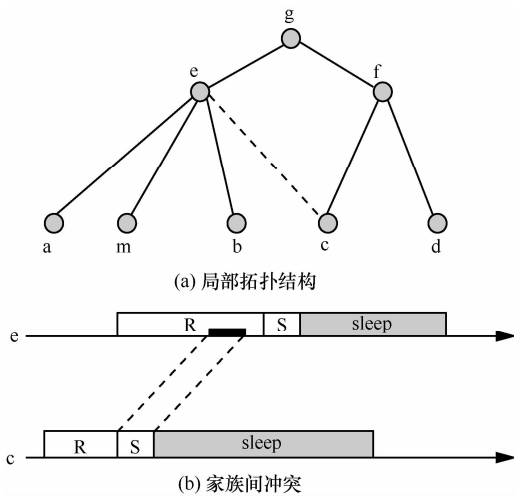


图 5 家族间冲突的例子

当 e 意识到会产生冲突时, e 将一个警告消息发送至 c 的父节点 f, 则 f 通过改变 c 的开始时刻 $t_s(c)$ 来避免此次冲突, 其方式为通过改变 c 在其兄弟节点中的发送次序 $X(c)$ 实现。这一方式称之为“同级协调”, 即节点 f 为其子节点 c 在发送序列中寻找一个合适的位置来避免与 e 发生“家族间冲突”。

然而, 有可能找不到一个合适 c 的位置来避免此次冲突, 在这种情况下, 只有通过改变 $t_s(f)$ 来改变 $t_s(c)$ 的值, 这超出了 f 节点的职权范围, 因此 f 将消息发送至 f 和 e 的公共父节点 g, g 通过改变 f 在其接收序列中的发送次序 $X(f)$ 来改变 $t_s(f)$ 的值, 从而能够改变 $t_s(c)$, 这一方式称之为“上级协调”。

同级协调和上级协调可以解决所有可能出现的“家族间冲突”问题, 并且保证在协调的过程中不会产生新的家族内部冲突或家族间冲突。

节点进行决策时, 通过运行 check 算法判断是否会产生一次家族间冲突, 若产生冲突, 则启动协调算法。以图 5 的 e 节点为例, 假设 $S_c(e)$ 为 e 的所有子节点的集合, check 算法可由如下伪代码描述:

```

Check(e)
Input: C(e), Sc(e)
Output: true or false;
1) for( i ∈ Sc(e)) {
2)   for( j ∈ CG(i)) {
3)     if( ts(j)+C(j)Tp+Le(j)<ts(e)+C(e)Tp ||
4)       ts(j)+[C(j)+1]Tp+Le(j)>ts(e))
5)       return false, j;
6)     }
7) }
8) return true
    
```

假设 X_f 为 f 的子节点的发送次序的集合, 以图 5 的节点 e 和 f 为例, 同级协调和上级协调算法可由如下伪代码描述:

```

Equative coordination & superior coordination ()
Input: Xf, ts(f), ts(e), C(e)
Output: Xf, ts(f)
1) for( i=1; i ≤ C(f); i++)
2) {
3)   if( ts(c)+C(c)Tp+Le(c)>ts(e)+C(e)Tp ||
4)     ts(c)+[C(c)+1]Tp+Le(c)<ts(e))
5)     X(c)=i;
6)     exchange the location of c and the node in
slot i in Xf
7)   if(check(f)
8)     return Xf; // 同级协调
9)   break;
10)  }
11) }
12) // 若同级协调失败, 则开始上级协调
13) for( j=1; j ≤ C(g); j++)
14) {
15)   X(f)=i;
16)   recalculate ts(f);
17)   if(check(f)) {
18)     for( i=1; i ≤ C(f); i++) {
    
```

```

19)   if(  $t_s(c)+C(c)T_p+L_c(c)>t_s(e)+C(e)T_p$  ||
20)    $t_s(c)+[C(c)+1]T_p+L_c(c)<t_s(e)$ )
22)    $X(c)=i$ ;
23)   exchange the location of c and the
node in slot i in  $X_f$ ;
24)   return  $X_f, t_s(f)$ ; // 上级协调
25)   break;
26)   }
27) } // end if
28) } // end

```

综上所述, UWSP 的主要流程如图 6 所示。对任意节点 m 来说, 首先接收父节点的决策, 包括 $X(m)$ 和父节点的 t_s ; 然后根据父节点的决策制定自己的决策, 包括自己的 t_s 和子节点的 X , 并运行 check() 算法检查是否有家族间冲突。如果发生冲突则启用同级协调和上级协调, 修改决策, 避免冲突。最后完全无冲突时, 将决策信息发送给其子节点。算法由基站开始一层一层向下进行直到叶节点处结束。

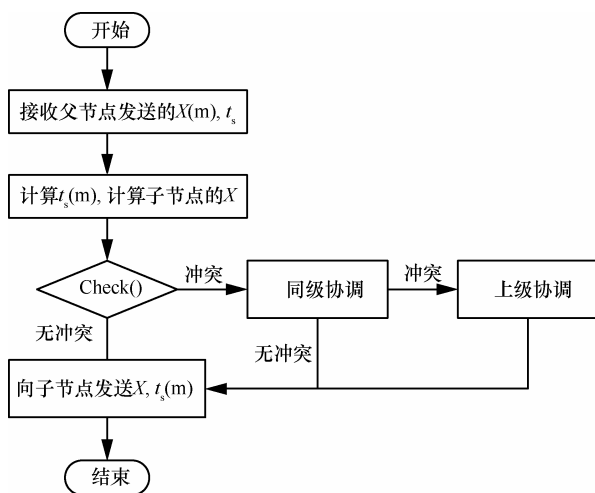


图 6 算法流程

UWSP 将节点的发送时隙和接收时隙集中在一起, 与现有的基于 TDMA 的协议 (如 ST-MAC、ECS 和 UW-FLASHR 等) 相比, 极大地减少了信道空闲的次数和空闲侦听的时间。现有协议仅致力于在提高网络并行传输的基础上避免冲突, 导致节点的空闲侦听时间过多, 工作时间分散。

此外, 在 UWSP 中, 由于接收节点可以预知发送节点的工作时间, 因此无需对其进行唤醒, 节省了发送唤醒帧需要的额外能耗。

UWSP 可以保证帧到达目的地时接收节点恰好处于接收状态。而在同一节点处, 节点的接收状态

和发送状态是连续的, 因此对于多跳传输而言, 数据的传输像跑马灯一样, 一跳接着一跳, 无需等待休眠, 因此, 协议的端到端传播延迟不受休眠时间的影响, 使网络性能得到保证。假设 n 层树型网络中节点的子节点平均数量为 C , 平均的链路延迟为 L , 则端到端的平均传播延迟为

$$\overline{Delay}_n = n \times \left(L + \frac{C}{2} T_p \right) \quad (4)$$

在式(4)中, $0.5 \times C \times T_p$ 表示了每个节点的平均队列等待时间, 该式表明了端到端的传播延迟与节点休眠时间的长短无关。综合以上分析可以得出结论: UWSP 既能够保证较高的能量效率, 又能够保证较低的端到端传播延迟。

此外, UWSP 是一个分布式的异步休眠协议, 所有节点享有相同长度的工作/休眠周期, 但各自的休眠/工作时间不一致, 因此它不要求全局的时钟同步, 而仅仅需要本地的轻量级时钟同步。

3 仿真结果

本节介绍了 UWSP 的仿真结果并进行分析。协议的运行环境为 Matlab 和 NS2 仿真软件, 参数设置为: T_p 设置为 1 s, 节点的通信半径和干扰半径均为 1 000 m, 水声信号的传播速度为 1 500 m/s, 水下传感器节点随机部署在 20 km×20 km 的区域中, 并组成树型拓扑结构。作为对比的 3 种协议为 T-Lohi、ST-MAC 和 UW-FLASHR, 其中 T-Lohi 为典型的竞争型协议, 节点采用异步休眠和长帧唤醒 (preamble) 的策略, 而 ST-MAC 和 UW-FLASHR 属于 TDMA 协议, 其休眠方式也为异步休眠, 节点按照调度计划, 在自己不工作时转入休眠状态。

仿真考察了 4 种协议在不同网络规模下的传输效率和能量效率。进行考察的 4 个参数分别是: 网络流量、平均端到端延迟、能量效率和空闲时间频率 (即休眠频率)。

网络流量定义为单位时间内网络中平均成功传输的数据报个数, 可以反映出网络的吞吐能力和数据传输的并行程度。如图 7 所示, UWSP 在 4 类协议中流量最高, 表明它的传输调度策略优于其他协议, T-Lohi 由于是竞争协议, 竞争导致的冲突、退避和重传带来的网络资源浪费导致其流量低于其他 3 种协议, 在节点密度较大的区域这种现象尤为严重。

平均的端到端延迟由消息从任意源节点到达基站需要的平均时间表示。图 8 显示了 4 种协议在

不同网络规模下的平均端到端延迟。结果表明端到端的延迟随着网络规模的增大而增大,但在任何条件下 UWSP 都能达到最低的端到端延迟,平均比 ST-MAC 低 20%。这一结果验证了 2 小节的理论分析,消息在其传播路径上遭遇节点的休眠必然会增大延迟,例如 ST-MAC 和 UW-FLASHR,而只有保证消息的传输不受节点休眠的影响,才能将端到端的传播延迟最小化。由于频繁的冲突, T-Lohi 协议的平均延迟最高,这再一次证明了高链路时延的水下网络不适合使用长帧唤醒 (preamble) 的异步休眠策略。综合图 7 和图 8 表明,4 种协议中 UWSP 拥有最好的数据传输效率。

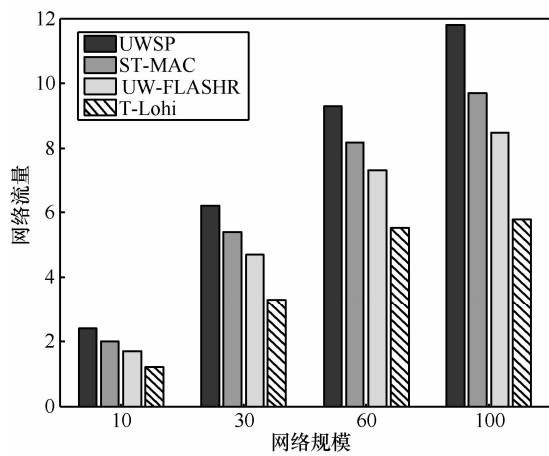


图 7 网络流量

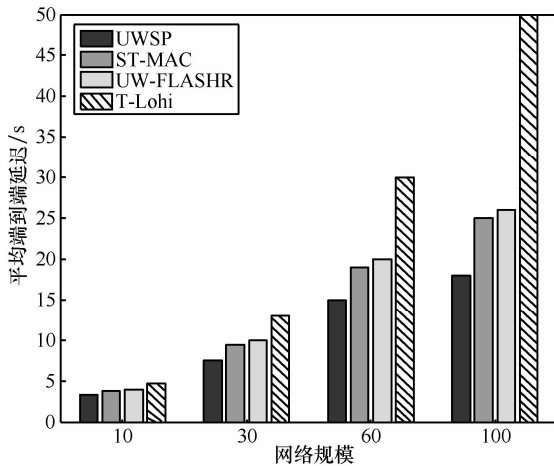


图 8 平均端到端传播延迟

能量效率的定义为传输数据信息消耗的能量与网络消耗的总能量之比。理论上, TDMA 最理想的能量效率应为 100%,因为它没有冲突带来的能量浪费。然而,仍然会有部分能量用于额外的开销,例如网络管理和控制信息的传播、缓冲区溢出引起

的重传等。图 9 显示了 4 种协议的能量效率, UWSP 和 ST-MAC 的能量效率都比较高, UW-FLASHR 是一个基于握手机制的动态 TDMA 协议,其数据传输之外的额外开销较多,因此能量效率略低。T-Lohi 能量效率最低的原因是多方面的,其中主要是发送较长的唤醒帧不仅会消耗大量的能量,而且会大大增加冲突发生的可能性。

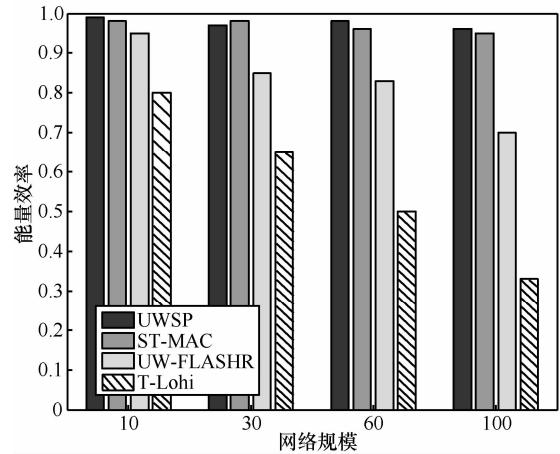


图 9 能量效率

图 10 显示了不同协议下节点在一段固定时间段内,信道空闲出现的次数。从结果可以看出 UWSP 协议下节点的信道空闲次数最少,因此其休眠/唤醒的频率也最低。休眠频率的减少可以进一步地节省能量,延长节点的使用寿命,减少冲突发生的概率。综合图 9 和图 10,表明 4 种协议中 UWSP 拥有最好的能量效率。

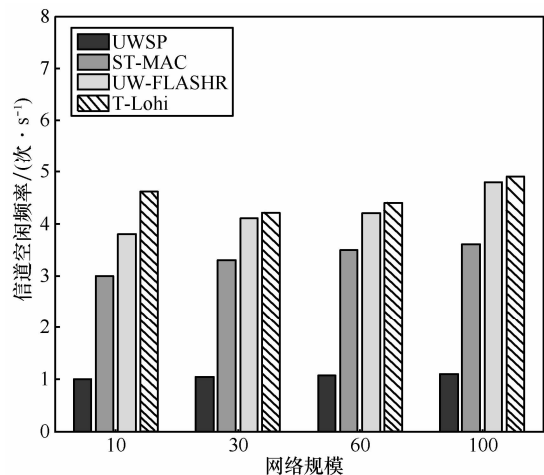


图 10 平均信道空闲

综上所述,通过仿真可以得出如下结论:基于长帧唤醒的异步休眠方式不适用于水下传感器网

络, 在基于 TDMA 的异步休眠方式中, 本文提出的 UWSP 协议优于已有方案, 拥有更好的网络传输效率和能量效率。

4 相关研究成果

本节介绍无线传感器网络已有的休眠策略。由于节点休眠与信道分配和利用紧密相关, 因此休眠算法多出现于 MAC 协议中。

4.1 WSN 的休眠策略

针对传统的无线传感器网络设计的休眠 MAC 协议包括同步和非同步两大类。

同步休眠协议如 S-MAC^[4]、T-MAC^[5]、TRAMA^[6]、SCP^[7]和 DW-MAC^[8]等, 要求节点同步的、周期性的休眠和醒来, 节点在醒来的时间完成通信, 因此, 这些协议的休眠策略是固定的。

非同步的休眠协议允许节点的休眠时间不相同, 因此需要特定的唤醒机制来完成通信。B-MAC^[9]和 X-MAC^[10]使用一个持续时间超过节点休眠时间的长帧唤醒接收节点, 每个节点醒来时首先监测信道的唤醒帧, 确定是否有数据需要接收。Z-MAC^[11]对此作了改进, 将长唤醒帧变为连续的段帧脉冲以节省发送能量。

为减小唤醒时间, 进一步节省能量, WiseMAC^[12]将节点的唤醒时间间隔固定, 因此节点能够预测接收方下一次醒来的时间, 类似于虚拟载波监听的策略, 从而缩短了唤醒时间。RI-MAC^[13]是以接收者为中心调度的休眠协议, 接收者广播自己醒来的消息而发送者仅回应一个短帧作为连接建立的标志, 从而进一步节省了唤醒能量。

这些基于唤醒的休眠协议很难应用于水声网络, 不仅由于水下唤醒耗费的能量更大, 而且在水声信道低带宽高误码率的恶劣通信环境中, 唤醒需要的额外通信开销也是沉重的负担。

4.2 UWSN 的休眠策略

水下传感器网络的 MAC 协议主要可分为竞争协议和无竞争的调度 (TDMA) 协议两类。由于竞争协议中节点的活跃时间随机且难以预测, 设计休眠机制较为困难, 因此现有的竞争协议 (如 T-Lohi^[14]、Slotted-FAMA^[15]和 Aloha-AN^[16]等) 不包含休眠方案和算法。

基于 TDMA 的协议如 ST-MAC^[17]、ECS^[18]和 UW-FLASHR^[19]等, 由于节点的工作时间固定, 可以预知和计算, 可允许节点在其不工作的时间进行

休眠。其中 ST-MAC 和 UW-FLASHR 为时隙工作方式, 利用水下链路时延的巨大差异性, 通过为节点分配不同的发送时隙错开节点的收发活动。ECS 则取消时隙的设定, 通过为节点分配发送时刻来最大限度的提高网络传输的并行程度。这些协议的主要问题是节点的工作时间长且分散, 不利于安排休眠, 并且协议中也缺乏对休眠机制的深入和系统的研究。

总之, 目前的水下传感器网络休眠机制研究成果较少, 现有休眠机制存在明显缺陷, 不适合水下节点的休眠。

5 结束语

水下传感器网络的休眠机制研究较为缺乏, 针对现有方案的缺陷, 本文提出了一个基于 TDMA 调度的水下节点休眠协议 UWSP。

该协议基于树型拓扑结构, 其基本思想是将节点的工作时间尽可能地集中, 并保证无冲突、无信道预约, 保证数据传输不受节点休眠的影响。UWSP 使用异步的休眠方式, 但不需要唤醒帧 (preamble) 对接收节点进行唤醒。

仿真结果表明与现有的水下 MAC 协议的休眠方案相比, UWSP 具有更好的传输效率和能量效率。UWSP 具有更高的网络流量, 更低的端到端延迟, 更好的节能效果和更少的信道空闲频率。未来的研究工作将致力于研究动态的水下传感器网络节点休眠策略, 使 UWSP 具有更加广泛的适应性。

参考文献:

- [1] SYED A A, YE W, KRISHNAMACHARI B, *et al.* Understanding spatio-temporal uncertainty in medium access with aloha protocols[A]. Proceedings of the Second ACM International Workshop on Under-Water Networks (WUWNet)[C]. Montreal, Quebec, Canada, 2007. 41-48.
- [2] Zhang J B, ZHOU G, HUANG C, *et al.* TMMAC: an energy efficient multi-channel mac protocol for Ad Hoc networks[A]. ICC 2007[C]. Glasgow, Scotland, 2007. 3554-3561.
- [3] WILSON S, WALRAND J, MO J. McMAC: a parallel rendezvous multi-channel MAC protocol[A]. WCNC 2007[C]. Hong Kong SAR, China, 2007. 334-339.
- [4] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2002[C]. New York, USA, 2002. 1567-1576.
- [5] TIJS V D, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. ACM SenSys 2003[C]. Los Angeles, CA, USA, 2003. 171-180.

- [6] RAJENDRAN V, OBRACZKA K, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks[A]. ACM SenSys 2003[C]. Los Angeles, CA, USA, 2003. 181-192.
- [7] YE W, SILVA F, HEIDEMANN J. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling[A]. ACM SenSys 2006[C]. Boulder, Colorado, USA, 2006. 321-334.
- [8] SUN Y J, DU S, GUREWITZ O, *et al.* DW-MAC: a low latency, energy efficient demand-wakeup mac protocol for wireless sensor networks[A]. MobiHoc 2008[C]. Hong Kong SAR, China, 2008. 53-62.
- [9] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[A]. ACM SenSys 2004[C]. Baltimore, MD, USA, 2004. 95-107.
- [10] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, *et al.* X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[A]. ACM SenSys 2006[C]. Boulder, Colorado, USA, 2006. 307-320.
- [11] INJONG R. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2008, 16(3):511-524.
- [12] EL-HOIYDI A, DECOTIGNIE J D. WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks[A]. ALGOSENSORS 2004[C]. Turku, Finland, 2004. 18-31.
- [13] SUN Y J, GUREWITZ O, JOHNSON D B. RI-MAC: a receiver initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks[A]. ACM SenSys 2008[C]. Raleigh, NC, USA, 2008.1-14.
- [14] SYED A A, YE W, HEIDEMANN J. T-lohi: a new class of MAC protocols for underwater acoustic sensor networks[A]. IEEE INFOCOM 2008[C]. Phoenix, AZ, USA, 2008. 231-235.
- [15] MOLINS M, STOJANOVIC M. Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks[A]. IEEE OCEANS 2006[C]. Singapore, 2006. 1-7.
- [16] CHIRDCHOO N, SOH W, CHUA K. Aloha-based MAC protocols with collision avoidance for underwater acoustic networks[A]. IEEE INFOCOM 2007[C]. Anchorage, Alaska, USA, 2007. 2271-2275.
- [17] HSU C C, LAI K F, CHOU C F, *et al.* ST-MAC: spatial-temporal mac scheduling for underwater sensor networks[A]. IEEE INFOCOM 2009[C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2009. 1827-1835.
- [18] HONG L, HONG F, GUO Z W, *et al.* ECS: efficient communication scheduling for underwater sensor networks[J]. Sensors, 2011, 11(3): 2920-2938.
- [19] YACKOSKI J, SHEN C C. UW-FLASHR: achieving high channel utilization in a time-based acoustic MAC protocol[A]. WUWNet 2008[C]. San Francisco, California, USA, 2008. 59-66.

作者简介:



洪璐 (1984-), 男, 山东济宁人, 博士, 潍坊学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络协议与算法。



洪锋 (1977-), 男, 山东青岛人, 博士, 中国海洋大学副教授, 主要研究方向为传感器网络、对等计算、网格计算。